DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160913

王宽, 蔡正华, 齐增湘, 陈坚, 李晖, 李涛, 冯倩. 2000—2013 年衡阳市土地利用格局转变对生态系统服务的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 1060−1070
Wang K, Cai Z H, Qi Z X, Chen J, Li H, Li T, Feng Q. Effect of land use transformation pattern in 2000–2013 on ecosystem services in Hengyang City, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 1060−1070

2000—2013 年衡阳市土地利用格局转变对生态系统服务的影响*

王 宽[1], 蔡正华[2], 齐增湘[1**], 陈 坚[1], 李 晖[1], 李 涛[1], 冯 倩[1]

(1. 南华大学设计艺术学院 衡阳 421001; 2. 衡阳市科技信息研究所 衡阳 421001)

摘 要: 将生态系统服务评估利用到区域生态保护决策中的重要途径之一是生态系统服务制图。本研究对衡阳市多期遥感影像进行解译, 采用当量因子法估算其生态系统服务价值(ESV)及由土地利用格局转变而引起的价值损益; 并在 ArcGIS 10.0 软件支持下, 利用空间自相关、高低聚类及重心分析等空间统计方法, 对衡阳市 ESV 的时空变化进行制图模拟, 以期为衡阳市的生态保护规划与管理提供决策辅助。研究结果表明: 1)2000—2013 年衡阳市的 ESV 略有降低, 由 2000 年的 2 410 亿元降至 2013 年的 2 394 亿元; 转移矩阵分析发现林地及耕地转为建设用地, 以及林地转为耕地是引起衡阳市 ESV 降低的最主要原因。2)衡阳市的 ESV 高值区对低值区呈包围态势; 2000—2013 年 ESV 损失区主要分布于市区及其东部区域, 而增值区主要分布于市区西部区域。3)衡阳市 ESV 的空间自相关与高低值聚集现象明显, 其程度趋于增强; ESV 重心向西偏北 9°方向迁移了 245.73 m。可考虑通过限制林地及耕地向建设用地的转变、实施"存量"或"减量"用地政策、维护和强化区域整体生态系统格局的连续性等措施来提高研究区的生态系统服务价值。
关键词: 生态系统服务价值; 土地利用; 空间统计方法; 衡阳市
中图分类号: F301.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)07-1060-11

Effect of land use transformation pattern in 2000–2013 on ecosystem services in Hengyang City, China*

WANG Kuan[1], CAI Zhenghua[2], QI Zengxiang[1**], CHEN Jian[1], LI Hui[1], LI Tao[1], FENG Qian[1]

(1. College of Design and Arts, South China University, Hengyang 421001, China; 2. Hengyang Institute of Science and Technology Information Research, Hengyang 421001, China)

Abstract: Using ecosystem services assessment in regional ecological protection is one of the most important ways in ecosystem services mapping. In order to perfect the method of ecosystem services mapping, spatio-temporal variations in ecosystem services value (ESV) in Hengyang Region was simulated based on interpretation of multi-period remote-sensing images of Hengyang City, estimation of ESV with the equivalent factor method and incurred profit-loss due to transformation of land use. Also the results of methods such as spatial autocorrelation, high-low clustering and barycenter analysis were analyzed in ArcGIS 10.0 environment. The results showed that: 1) the proportion of ESV components were different in the study area and

* 湖南省科技计划项目(2015SK2003)、衡阳市社会科学项目(2015D040, 2016D090, 2016D038)和衡阳市科技计划项目(2015KS02)资助
** 通讯作者: 齐增湘, 主要研究方向为生态规划与设计。E-mail: ecotope@163.com
王宽, 主要研究方向为环境生态学及生态规划与设计。E-mail: 349128948@qq.com
收稿日期: 2016-10-17 接受日期: 2017-03-03

* This work was supported by the Science & Technology Project of Hunan Province (2015SK2003), the Social Science Project of Hengyang (2015D040, 2016D090, 2016D038) and the Science & Technology Project of Hengyang (2015KS02).
** Corresponding author, E-mail: ecotope@163.com
Received Oct. 17, 2016; accepted Mar. 3, 2017

decreased with the sequence of biodiversity conservation, water conservation, soil formation and conservation, climate regulation, gas exchange, raw material, waste disposal, entertainment and food production. The ESV for Hengyang City decreased slightly from 241.0 billion Yuan to 239.4 billion Yuan during 2000–2013. The transformation of forests and cultivated lands into construction lands and the transformation of forests into cultivated lands were identified as the main reasons for the decrease in ESV revealed by conversion matrix analysis. 2) Areas with low ESV were nearly encircled by those with high ESV. While regions with losses in ESV were mainly distributed around the urban and county districts, value-added regions were located in the western zone of the study area. 3) Spatial autocorrelation and value aggregation phenomena were obvious, which tends strengthened. The barycenter of ESV moved 245.73 meters west-northwest 9°. To improve ESV in the study area, measures including limiting transformation of forests and cultivated lands into construction lands, conducting "stock" or "reduction" policy on land use, and preserving and intensifying continuity of whole ecosystem patterns were required. Compared with previous studies, the spatial distribution of ESV was visualized in this study as more precisely expressing the income and transfer of ESV. This was critical for the promotion of more reasonable ecological protection planning and management works in the study area and beyond.

Keywords: Ecosystem service value; Land use; Spatial statistical analysis; Hengyang City

生态系统服务是指自然生态系统及其物种所提供的能够满足和维持人类生活需要的条件和过程[1-2]。对其价值进行定量评估有利于高效、合理配置竞争性环境资源[3]，有利于科学制定生态环境建设补偿政策[4]。Costanza 等[5]最先对生态系统服务价值(ecosystem service values，以下均用"ESV"表示)进行了定量评估，并成为国际可持续发展研究的热点之一。欧阳志云等[6-7]、傅伯杰等[8-9]对生态系统服务价值的概念、效用及评估方法进行了较详细的论述；谢高地等[10-12]多次对 Constanza 的研究方法进行了改进，得出了适合我国国情的 ESV 当量系数，利用当量因子法对区域 ESV 进行评估已被国内外学者广泛采纳。此外，综合生态参数和价值当量，以及从生态资产角度对区域 ESV 进行评估的方法也得到了较好应用与发展[13-14]。

土地利用/覆盖变化(LUCC)影响生态系统的结构和功能[15]，其对生态系统维持服务功能起决定性作用[16]，因此，诸多学者利用不同方法在不同时间、空间尺度上对土地利用变化引起的 ESV 变化进行了研究[17-18]。随着 3S 技术的发展，国内外已有不少学者将遥感数据与生理生态模型相结合，采用当量因子进行 ESV 评估，并对其空间分布进行制图模拟，其结果为区域保护决策与管理规划的制定提供了很好的支持[19-20]。但利用 3S 技术进行区域 ESV 损益情况的空间分布模拟以及利用空间统计分析来揭示 ESV 的时空格局变化规律与特征的研究尚显不足。

本研究以湖南省衡阳市为例，在 ArcGIS 10.0 软件支持下，基于衡阳市多年遥感影像数据及经济发展统计数据，对其 ESV 进行评估，进行 ESV 及其损益的空间分布制图模拟；并利用空间统计分析方法，探究衡阳市 ESV 的时空动态演化特征。研究结果可为衡阳市进行区域生态安全管理及发展生态型经济提供必要参考。

1　研究区概况

衡阳市位于湖南省中南部，湘江中游，衡山之南，是湖南省域副中心城市、中南地区重要工业城市、区域性物流中心，现辖 5 区(石鼓区、雁峰区、珠晖区、蒸湘区、南岳区)5 县(衡阳县、衡南县、衡山县、衡东县、祁东县)、代管 2 个县级市(耒阳市、常宁市)。地处东经 110°32′16″~113°16′32″，北纬 26°07′05″~27°28′24″，总面积约 15 310 km^2。近年来，衡阳市经济与社会发展迅速，区域土地利用类型及其空间结构也随之发生了较大变化，进而影响到区域内生态系统服务价值。

2　研究方法

2.1　数据来源与处理

采用衡阳地区 2000 年、2005 年、2010 年及 2013 年同期的 LandSatTM 遥感影像，空间分辨率 30 m×30 m。根据研究所需，采用目视解译方式，将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、湿地、水域、建设用地及未利用地共 7 个类型得到研究区土地利用类型(图 1)，其总体精度分别为 85.2%、86.5%、88.7%、87.4%，Kappa 值超过 0.8，达到本研究所需。相关经济与社会发展数据来源于衡阳市统计年鉴。

2.2　研究方法

2.2.1　土地利用格局转变的 ESV 核算

采用基于单位面积价值当量因子的方法对衡阳市土地利用格局转变引起的 ESV 变化进行核算。ESV 当量因子是生态系统产生服务的相对贡献率。

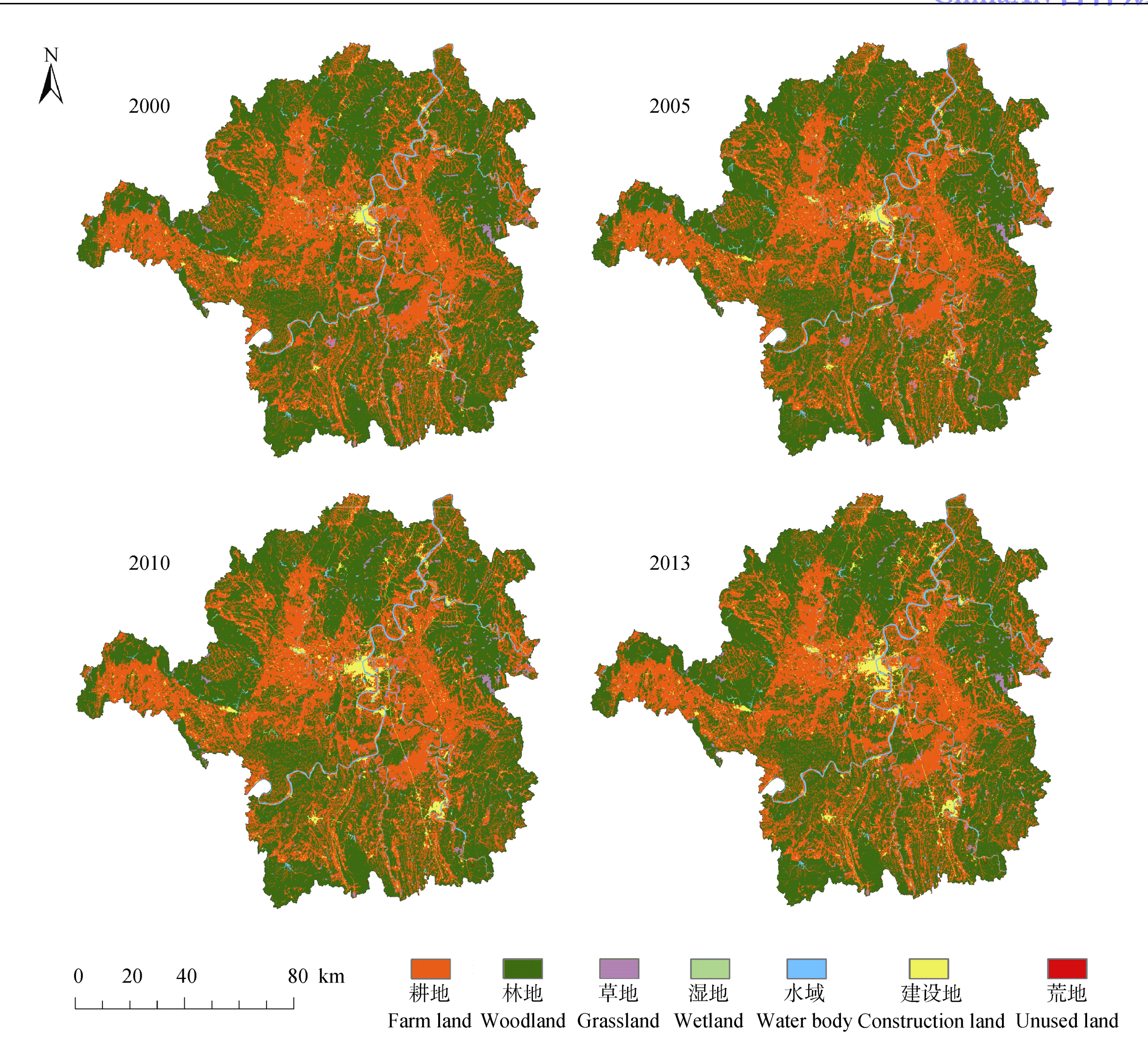


图 1 衡阳市 2000 年、2005 年、2010 年和 2013 年土地利用类型

Fig. 1 Maps of land use types in Hengyang City in 2000, 2005, 2010 and 2013

根据谢高地等[10]的定义，中国地区 1 个 ESV 当量因子的经济价值等于当年全国平均粮食单产市场价格的 1/7。为使研究结果体现区域特征，在利用研究区粮食产量进行 ESV 当量因子计算的同时，引入基于生物量的调整因子[11]对研究区的 ESV 价值系数进行修正。

计算研究区的土地利用转移矩阵，并核算研究区土地利用格局转变引起的 ESV 损益。传统的基于各用地类型面积的 ESV 分析模型，只考虑监测期间的 ESV 数值的变化，无法深层次地反映 ESV 损益的去向及来源。基于土地转移矩阵分析 ESV，能够同时考虑各用地类型的 ESV 的空间转移分布和数量变化方向，能更深入揭示 ESV 的变化特征。

核算过程所涉及到的计算公式见表 1。

2.2.2 ESV 演变的空间统计分析

地理数据受空间相互作用及空间扩散的影响，某位置上的数据与其他位置上的数据彼此间存在相互依赖的现象，即空间自相关性。对 ESV 在一定地理范围内不同空间单元间的相互影响和依赖程度进行分析，是把握其演变特征与规律的关键。采用 Global Moran's I、Getis-Ord General G 探测研究区 ESV 在特定尺度上的空间自相关性、高/低聚类。Global Moran's I 用于分析 ESV 的整体空间自相关性，Getis-Ord General G 用于探测 ESV 是否存在空间集聚。重心分析是一种探讨地理现象空间分异及其动态变化过程的方法，运用重心概念，分析 ESV 移动方向及距离来反映区域 ESV 的空间差异，探寻其动态演变过程。

分析中所涉及的公式见表 2。

3 结果与分析

3.1 ESV 的变化

3.1.1 ESV 结构的变化

基于研究区遥感解译数据(图 1)，利用上述 ESV 估算模型，得出衡阳市 2000 年、2005 年、2010 年及 2013 年 ESV 值(表 3)，并计算这 4 个时期的 ESV 均值，制作衡阳市 2000—2013 年 ESV 平均分布格局图(图 2)。

表 1　生态系统服务价值核算中利用到的公式及其变量

Table 1　Formulas and variables in the ecosystem services value (ESV) accounting

公式含义 Meaning of formula	公式内容 Content of formula	变量 Variable	变量含义 Meaning of variable	变量单位 Unit of variable
生态系统服务价值计算公式 Formula of ESV	$ESV=\sum_{k=1}^{n}(A_k\times VC_k)$	ESV	生态系统服务价值 Ecosystem services value	¥·hm^{-2}·a^{-1}
		A_k	土地利用类型 k 的面积 Area of land use type k	hm^2
		VC_k	土地利用类型 k 的生态系统价值系数 Coefficient of ESV of land use type k	¥·hm^{-2}·a^{-1}
生态系统第 f 项服务功能价值计算公式 Formula of ESV of item f	$ESV_f=\sum(A_k\times VC_{fk})$	ESV_f	生态系统第 f 项服务功能价值 Value of ecosystem service function f	元 ¥
		VC_{fk}	土地利用类型 k 的第 f 项服务功能价值系数 Value of ecosystem service function f of land use type k	¥·hm^{-2}·a^{-1}
生态系统服务价值系数公式 Formula of coefficient of ESV	$VC_0=\frac{1}{7}\times P\times\bar{Q}\times D_{ij}\times B_i$ [10]	VC_0	生态系统服务价值系数 Coefficient of ESV	¥·hm^{-2}·a^{-1}
		P	研究末年全国平均粮食价格 National average price of grain at the end of the period	¥·kg^{-1}
		$\bar{Q}$	研究时段内的平均粮食年产量 Average annual grain yield during the study period	kg·hm^{-2}
		D_{ij}	中国陆地第 i 类生态系统的第 j 项服务功能的当量因子[12] Value equivalent factor of ecosystem services function j in Chinese terrestrial ecosystem i	—
		B_i	第 i 类生态系统的生物量因子调整系数[11] Adjustment coefficient of biomass factor in ecosystem i	—
土地利用格局转变的 ESV 损益系数计算公式 Coefficient formula of land use pattern transfer income	$VC_e=\sum(A_k\times VC_k-VC_{k'})$	VC_e	土地利用格局转变的 ESV 损益系数 ESV income coefficient of land use pattern transfer	¥·hm^{-2}·a^{-1}
		VC_k	土地利用类型 k 转变前的 ESV 系数 ESV coefficient before transfer of land use type k	¥·hm^{-2}·a^{-1}

表 2　生态系统服务价值空间统计分析中利用到的公式及其变量

Table 2　Formulas and variables in the spatial statistical analysis of ecosystem services value (ESV)

序号 Ordinal	公式含义 Meaning of formula	公式内容 Content of formula	变量 Variable	变量含义 Meaning of variable	变量单位 Unit of variable
1	空间自相关分析计算公式 Formula of spatial autocorrelation	$I=\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}}\times\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}$	I	全局空间自相关指数 Index of spatial autocorrelation	
			x_i, x_j	空间单元 i、j 的 ESV 指数 ESV index of space unit i, j	¥·hm^{-2}·a^{-1}
			$\bar{x}$	ESV 的均值 Average value of ESV	¥·hm^{-2}·a^{-1}
			W_{ij}	二进制空间权重矩阵 Binary space weight matrix	—
			n	空间单元个数 Number of units	—
2	高/低聚类指数计算公式 Formula of high/low cluster index	$G=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}x_ij_i\Big/\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}x_ij_i$ $(i\neq j)$	G	G 指数取值范围为[0, 1], 值越高越趋向于高值聚集。$G>E(G)$, 且 $Z(G)$显著时, 检测出高值聚集; G 值$<E(G)$, 且 $Z(G)$显著时, 检测出低值聚集($E(G)$为 G 的理论期望值, $Z(G)$为 G 的理论方差值。The G index range was [0, 1], the higher value tends to higher value aggregation. When $G > E(G)$ and $Z(G)$ significantly, the high value aggregation detected. When $G < E(G)$ and $Z(G)$ significantly, the low value aggregation detected. $E(G)$ is theoretical expectation of G, $Z(G)$ is theoretical value of variance of G.	—
3	冷/热点指数计算公式 Formula of hot/cold index	$G_i^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}x_j-\bar{X}\sum_{i=1}^{n}w_{i,j}}{S\sqrt{\left[n\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}^2-\left(\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}\right)^2\right]\Big/(n-1)}}$	G_i*	G_i*指数的 Z 得分越高, 热点聚集越紧密, 表明单元周围的属性值相对较高, 且有 $\bar{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$, $S=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2-(\bar{x})^2}$ 。The higher the Z score of the G_i* index is, the closer the hot spot aggregation, which shows that the attribute value around unit is relatively high. And: $\bar{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$, $S=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2-(\bar{x})^2}$	—
			x_j	空间单元 j 的 ESV 指数变化量 Variation of ESV index of spatial unit j	—
4	重心计算公式 Formula of barycenter	$\bar{X}=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n}$, $\bar{Y}=\frac{\sum_{i=1}^{n}y_i}{n}$	$\bar{x}$, $\bar{y}$	表示“重心”的坐标 Coordinates of the barycenter	—
			X_i, y_i	要素 i 的坐标 Coordinates of the factor i	—
			n	要素总数 Number of factor	—

续表

序号 Ordinal	公式含义 Meaning of formula	公式内容 Content of formula	变量 Variable	变量含义 Meaning of variable	变量单位 Unit of variable
5	重心移动距离计算公式 Formula of barycenter moving	$D_{mn}=C\left[(Y_m-Y_n)^2+(X_m-X_n)^2\right]^{1/2}$	D_{mn}	m 年份到 n 年份间重心移动的距离 Moving distance of barycenter from year m to year n	km
			(X_m, y_m) (X_n, y_n)	(X_m, y_m)和(X_n, y_n)表示第 m 年和第 n 年的区域重心坐标 (X_m, y_m), (X_n, y_n) represent regional barycentric coordinates in year m and n.	—
			C	常数，取 111.111，是把地全标单位(经纬度)换算成平面距离(km)的系数 Constant, value is 111.111, the coefficient converting the whole standard unit (latitude and longitude) into the plane distance (km).	—

表 3 衡阳市 2000—2013 年生态系统服务价值结构变化

Table 3 Structure changes of ecosystem services value of Hengyang City in 2000—2013

服务功能 Ecosystem service and function	服务价值 Service value (×10^8 ¥) 2000	2005	2010	2013	2000—2005 价值变化 Value change (×10^8 ¥)	2000—2005 变化率 Change rate (%)	2005—2010 价值变化 Value change (×10^8 ¥)	2005—2010 变化率 Change rate (%)	2010—2013 价值变化 Value change (×10^8 ¥)	2010—2013 变化率 Change rate (%)	2000—2013 价值变化 Value change (×10^8 ¥)	2000—2013 变化率 Change rate (%)
气体交换 Gas regulation	331.29	330.76	330.17	329.20	−0.53	−0.16	−0.60	−0.18	−0.96	−0.29	−2.09	−0.63
气候调节 Climate regulation	330.89	331.49	330.49	329.58	0.61	0.18	−1.00	−0.30	−0.91	−0.27	−1.30	−0.39
水源涵养 Water conservation	360.94	361.83	359.68	358.79	0.89	0.25	−2.15	−0.59	−0.89	−0.25	−2.15	−0.60
土壤形成与保护 Soil formation and protection	346.78	346.13	344.85	343.85	−0.65	−0.19	−1.28	−0.37	−1.00	−0.29	−2.93	−0.85
废物处理 Waste treatment	219.58	220.77	218.37	217.89	1.18	0.54	−2.40	−1.09	−0.48	−0.22	−1.70	−0.78
生物多样性保护 Biodiversity conservation	365.61	365.18	364.08	363.04	−0.43	−0.12	−1.11	−0.30	−1.04	−0.29	−2.57	−0.70
食物生产 Food production	71.18	71.01	70.19	67.00	−0.17	−0.24	−0.82	−1.15	−0.19	−0.28	−1.18	−1.66
原材料 Raw material	222.43	221.94	221.74	221.09	−0.49	−0.22	−0.20	−0.09	−0.65	−0.29	−1.34	−0.60
娱乐休闲 Entertainment culture	161.40	161.61	161.07	160.63	0.20	0.12	−0.54	−0.34	−0.43	−0.27	−0.78	−0.48
合计 Total	2 410.10	2 410.72	2 400.63	2 394.07	0.65	0.03	−10.09	−0.42	−6.56	−0.27	−16.04	−0.67

计算结果表明：①从 ESV 价值构成方面来看，衡阳市各单项生态功能价值所占比例的大小依次为生物多样性保护>水源涵养>土壤形成与保护>气候调节>气体交换>原材料>废物处理>休闲娱乐>食物生产。前 5 项服务功能的价值量相对较高且相差不大，2000—2013 年平均占总功能价值量的比例分别为 15.16%、14.99%、14.37%、13.75%、13.74%；原材料与废物处理的功能价值量次之，这 2 项各占总功能价值量的 9.23%、9.12%；食物生产与娱乐休闲的价值量最低，两者各占总功能价值量的 2.94%和 6.71%。②从 ESV 变化情况来看，2000—2013 年衡阳市 ESV 变化较缓，所有单项 ESV 均略有降低，总量减少 0.67%。在 2000—2005 年间，衡阳市 ESV 量增加了 0.62 亿元，是由于其生态服务功能中的废物处理、水源涵养、气候调节及娱乐休闲的价值量略有增加，分别增加了 0.54%、0.25%、0.18%和 0.12%；2005—2010 年间及 2010—2013 年间，所有单项 ESV 均呈减少趋势。

ESV 平均分布格局图显示：衡阳市 ESV 高值区大体分布于靠近市界线的山林地，而低值区多分布于市域范围的较中心处，此范围内地势较缓，适宜城镇建设及农耕开发。整体看来，高值区与低值区均具有较好的整体性及连续性，高值区对低值区呈包围态势，低值区以市区为核向各县城区心蔓延，与衡阳市的盆地地形暗合。

3.1.2 土地利用格局转变的 ESV 损益

根据图 1 计算衡阳市土地利用格局的转移矩阵，并结合 ESV 计算公式，得出由于土地利用格局转变引起的 ESV 损益结果(表 4)，并利用 ArcGIS 软件中的栅格计算器及插值分析得出各研究时段的 ESV 损益空间分布图(图 3)。

表 4　2000—2013 年衡阳市土地利用格局转变引起的生态系统服务价值(EVS)损益

Table 4　Profit and loss of ecosystem services value (EVS) caused by the changes of land use pattern in Hengyang City in 2000–2013

年份 Year	土地类型 Type of land use	耕地 Farm land		林地 Woodland		草地 Grassland		湿地 Wetland		水域 Water body		建设地 Construction land		荒地 Unused land	
		转移量 Transfer amount (hm^2)	ESV 损益 Profit and loss of ESV (10^8 ¥)	转移量 Transfer Amount (hm^2)	ESV 损益 Profit and loss of ESV (10^8 ¥)	转移量 Transfer amount (hm^2)	ESV 损益 Profit and loss of ESV (10^8 ¥)	转移量 Transfer amount (hm^2)	ESV 损益 Profit and loss of ESV (10^8 ¥)	转移量 Transfer amount t (hm^2)	ESV 损益 Profit and loss of ESV (10^8 ¥)	转移量 Transfer amount (hm^2)	ESV 损益 Profit and loss of ESV (10^8 ¥)	转移量 Transfer amount (hm^2)	ESV 损益 Profit and loss of ESV (10^8 ¥)
2000—2005	耕地 Farm land	—	—	480.05	0.77	0.00	0.00	102.06	0.38	397.89	1.18	1 661.58	−1.04	0.00	0.00
	林地 Woodland	295.11	−0.47	—	—	24.93	−0.03	28.98	0.06	1 130.04	1.54	10 410.79	−2.24	0.00	0.00
	草地 Grassland	0.99	−0.00	50.04	0.06	—	—	4.41	0.02	2.34	0.01	3.51	−0.00	0.00	0.00
	湿地 Wetland	16.38	−0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	—	—	121.95	−0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
	水域 Water body	159.30	−0.47	8.82	−0.01	0.00	0.00	1 260.45	0.94	—	—	26.19	−0.09	0.00	0.00
	建设地 Construction land	77.67	0.05	36.00	0.08	0.00	0.00	12.60	0.05	2.25	0.01	—	—	0.00	0.00
	荒地 Unused land	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	—
2005—2010	耕地 Farm land	556 297.74	0.00	25 750.35	41.07	367.74	0.11	225.63	0.83	1 734.03	5.12	7 904.28	−4.93	22.14	−0.01
	林地 Woodland	22 428.27	−35.77	830 243.07	0.00	813.96	−1.06	217.98	0.46	979.74	1.33	6 132.87	−13.60	117.45	0.00
	草地 Grassland	504.54	−0.15	2 839.68	3.68	13 968.00	0.00	6.66	0.02	25.65	0.07	222.39	−0.20	1.26	0.00
	湿地 Wetland	152.55	−0.56	203.40	−0.43	4.77	−0.02	1 305.00	0.00	1 016.46	−0.76	28.89	−0.12	0.00	0.00
	水域 Water body	1 807.47	−5.34	2 085.93	−2.84	8.37	−0.02	857.25	0.64	24 220.35	0.00	152.91	−0.55	0.00	0.00
	建设地 Construction land	1 870.29	1.17	474.84	1.05	6.03	0.06	4.14	0.02	157.14	0.56	24 794.01	0.00	0.27	0.00
	荒地 Unused land	23.13	0.01	34.47	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	12.60	0.04	61.74	−0.01	113.04	0.00
2010—2013	耕地 Farm land	578 130.66	0.00	2 845.35	4.54	41.49	0.01	7.11	0.03	116.55	0.34	1 970.85	−1.23	1.08	0.00
	林地 Woodland	2 866.41	−4.57	855 893.61	0.00	39.33	−0.05	56.97	0.12	108.45	0.15	2 658.33	−5.90	8.64	0.00
	草地 Grassland	51.12	−0.02	92.88	0.12	15 005.61	0.00	0.09	0.00	0.81	0.00	18.36	−0.02	0.00	0.00
	湿地 Wetland	11.16	−0.04	21.78	−0.05	0.00	0.00	2 571.03	0.00	12.51	−0.01	0.18	−0.01	0.00	0.00
	水域 Water body	74.97	−0.22	106.11	−0.14	0.45	−0.00	23.94	0.02	27 893.16	0.00	47.34	−0.17	0.00	0.00
	建设地 Construction land	359.91	0.22	107.64	0.24	2.97	0.00	0.09	0.00	13.68	0.05	38 571.84	0.00	0.18	0.00
	荒地 Unused land	0.72	0.00	2.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	251.10	0.00

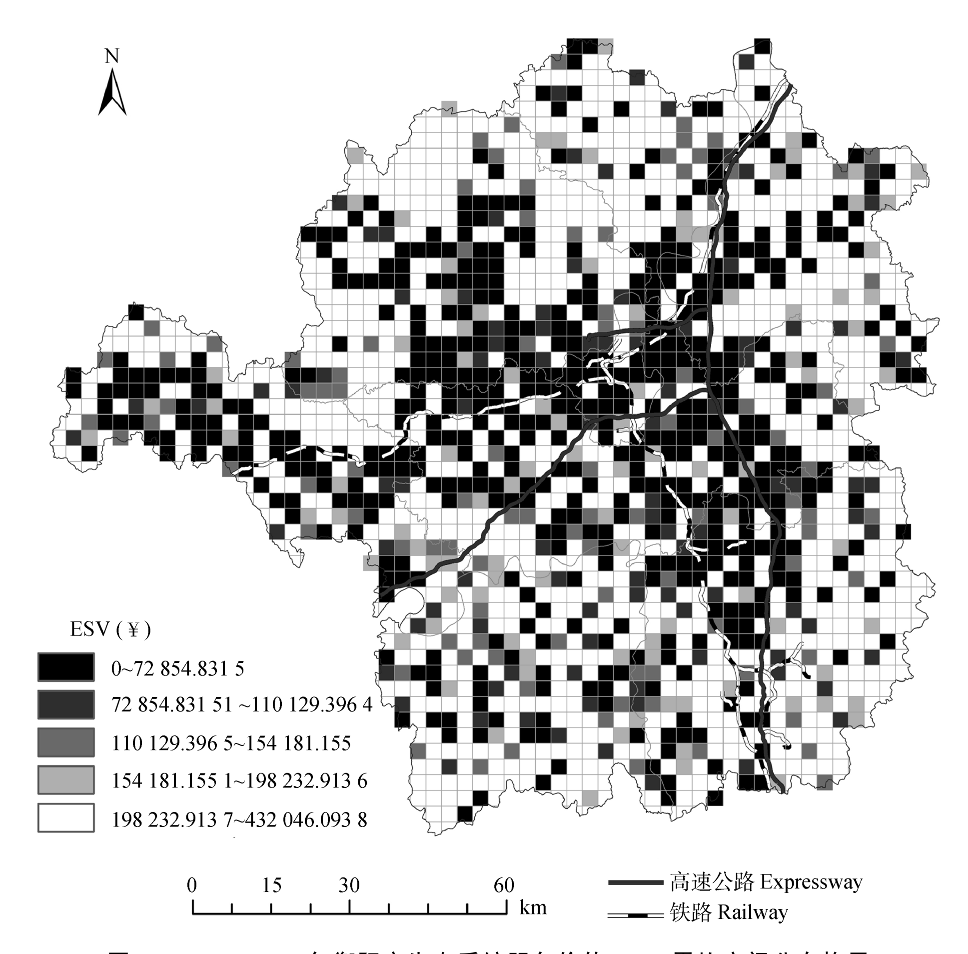


图 2　2000—2013 年衡阳市生态系统服务价值(EVS)平均空间分布格局

Fig. 2　Spatial distribution pattern of average ecosystem services value (EVS) in Hengyang City from 2000 to 2013

计算结果表明: ①2000—2005 年间, 由于土地转变引起 ESV 增值 5.13 亿元, 损失 4.51 亿元, 共计增值 0.62 亿元。增值中贡献较多的土地利用转变方式为耕地转林地、耕地转水域、林地转水域以及水域转湿地这 4 种, 约 86%的增值来自于这 4 种转变方式; 耕地、林地转为建设用地是引起此时段 ESV 损失的主要原因, 总损失量的 73%由这两种转变引起。②2005—2010 年间, ESV 增值 56.27 亿元, 损失 66.37 亿元, 共计损失 10.09 亿元, 显示出此时段内的土地格局变化较另外两个研究时段更为剧烈。增值中贡献较多的土地利用转变方式为耕地向林地、水域的转变, 高达 70%的增值来自于这两种转变方式; 而林地转为耕地及建设用地是引起此时段 ESV 损失的主要原因, 总损失量的 87%由这两种转变引起。③2010—2013 年间, ESV 增值 5.85 亿元, 损失 12.41 亿元, 共计损失 6.57 亿元。其中耕地与林地的相互转变引起的 ESV 损益基本持平, 造成 ESV 损失的主要原因在于林地及耕地向建设用地的转变, 这两种转变引起 ESV 损失达 6.1 亿元。

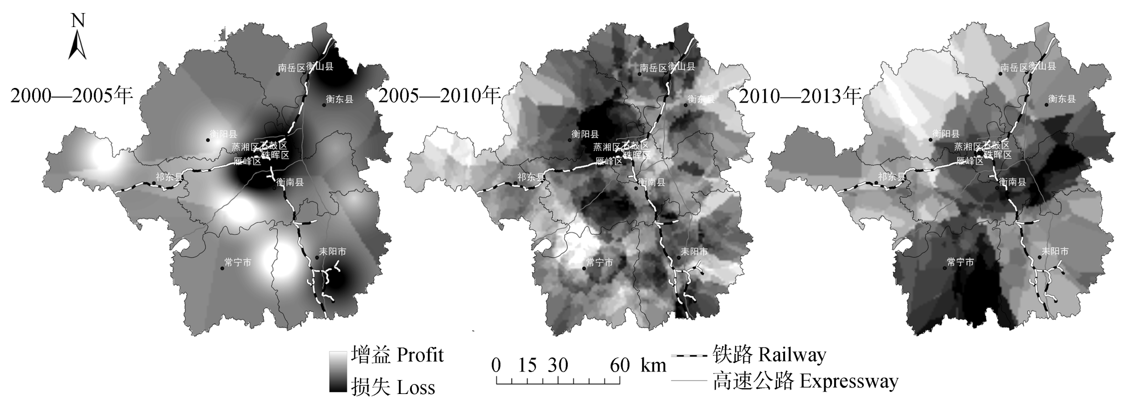


图 3　2000—2013 年衡阳市生态系统服务价值(ESV)损益分布空间格局

Fig. 3　Spatial distribution patterns of profit and loss of ecosystem services value (ESV) in Hengyang City from 2000 to 2013

ESV 损益空间分布格局图显示: ①2000—2005 年间, ESV 损失区主要分布于市区、衡东县城区北部以及耒阳市城区南稍偏东部处; 增值区主要分布于衡阳县东部、祁东县西部、衡南县西南部以及常宁市东部区域。②2005—2010 年间, ESV 的损益分布较另外两个研究时段复杂, 损失区主要分布于衡阳县东部与市区相邻区域、衡南县城区西南部区域、耒阳市南端的铁路及高速公路周边区域、衡东山县的南部及北部区域、衡山县南部以及南岳区西稍偏北部区域; 增值区主要分布于衡南县东北部与市区相接处、衡阳县西北部、祁东县西北部、衡东县东部、常宁市西北部以及耒阳市东北及东南部区域。③2010—2013 年间, ESV 损失区主要分布于衡南县东部、衡东县南部以及常宁市东南部区域, 另外市区以及衡阳县、衡东县、衡南县与市区接壤区域的 ESV 也损失较明显; 增值区主要分布在衡阳县北部、衡山县西北部、衡阳县西部、祁东县南部以及耒阳市南部区域。

3.2　ESV 的空间自相关与高/低聚类分析

计算结果(表 5)显示: ①空间自相关分析中, 4 个年份的 I 值较高, 同时引入标准化统计量 $Z(I)$ 用以检验空间自相关的显著性水平, $Z(I)=\left[I-E(I)\right]/\sqrt{\mathrm{Var}(I)}$ [其中 $E(I)$、$\mathrm{Var}(I)$ 分别为指数 I 的理论期望值与理论方差值]。结果显示, $Z(I)$ 值全部高于 1%显著性水平标准值, 这表明衡阳市 ESV 的空间分布具有较强的空间自相关性, 空间分布格局呈聚集模式; 另外 4 个时期的 I 指数与 $Z(I)$ 值呈先下降后上升的趋势, 表明衡阳市的 ESV 空间自相关性先趋向减弱再趋于增强。②高/低聚类分析中, 4 个年份 ESV 的 G 指数无明显大于 $E(G)$ 值, 但 $Z(G)$ 值较显著, 表明衡阳市 ESV 的空间分布存在高值及低值聚集模式; $Z(G)$ 值呈先下降后上升趋势, 表明 ESV 的高值以及低值的聚集程度在 2000—2005 年间有所弱化, 其后又一直增强并超过 2000 年时的聚集程度。

表 5　2000—2013 年衡阳市生态系统服务价值(ESV)空间自相关值(I)与高/低聚类指数

Table 5　Spatial autocorrelation & high/low clustering index of ecosystem services value (ESV) in Hengyang City in 2000–2013

指数 index	ESV 空间自相关 Spatial autocorrelation of ESV				指数 index	ESV 的 G 统计 Getis-Ord general G of ESV			
	2000	2005	2010	2013		2000	2005	2010	2013
Moran's I	0.157 1	0.156 0	0.166 0	0.166 6	G	1E-6	1E-6	1E-6	1E-6
$Z(I)$	8.997 0	8.933 5	9.503 2	9.537 6	$E(G)$	1E-6	1E-6	1E-6	1E-6
\	—				$Z(G)$	5.400 0	5.321 2	5.676 1	5.674 4

3.3　ESV 高值区重心迁移轨迹

根据表 2 中的公式 4, 计算 4 个年份的 ESV 加权重心, 制作 ESV 重心迁移轨迹图(图 4), 并统计其迁移距离(图 5)。由图 4 可看出, 2000—2013 年衡阳市的 ESV 重心一直落入于珠晖区长尾冲附近。图 5 显示 2000—2013 年衡阳市的 ESV 重心迁移非常缓慢, 主要向西稍偏北方向移动, 大体上呈"U"型态势。ESV 重心迁移具有一定的阶段性, 经历了"缓慢—剧烈—缓慢"的变化阶段, 2000—2013 年间的总迁移直线距离约为 247 m, 分阶段来看, 2005—2010 年间 ESV 重心平均年际移动距离最长, 为 ESV 重心迁移的剧烈阶段, 其余两个阶段平均移动距离相差不大。

4　讨论与结论

本研究以当量因子法为基础, 对衡阳市的遥感影像进行解译, 得到 7 种类型的土地利用方式, 利用生物量指标对 ESV 当量因子进行修正, 估算各年份研究区的 ESV, 并对研究区的 ESV 分布及损益的空间分布进行制图模拟, 运用空间自相关、高低聚类及加权重心求算等空间统计分析方法, 探究衡阳市 ESV 的时空动态演化特征。研究结果可为衡阳市决策者制定符合客观实际的土地利用结构、进行环境保护与管理生态系统提供参考, 促进衡阳市经济、社会与生态的协调发展。

研究发现: ①2000—2005 年, 衡阳市 ESV 总量略有上升, 这应该主要得益于湖南省自 2000 年开展实施的退耕还林工程; 而 2005—2013 年衡阳市 ESV 总量的持续下降, 可能是衡阳市城市化进程中侵占林地及耕地带来的必然问题。②衡阳市 ESV 的平均分布格局为外围高内心低, 这主要与衡阳市的盆地地形有关,已有不少研究发现地形因子对区域的生态环境质量影响显著[21-23]。③影响衡阳市 ESV 损益变化的主要原因为林地、耕地及建设用地三者间的交互转变, 损益分析图显示, ESV 损失区主要发生在市区及各县城区所在地, 这应是城市建设使大量耕地及林地转为建设用地, 卫星影像图显示, 衡阳市的建设用地面积 2000—2013 年共增加了 18 504.72 hm^2。④衡阳市的 ESV 重心在向西稍偏北

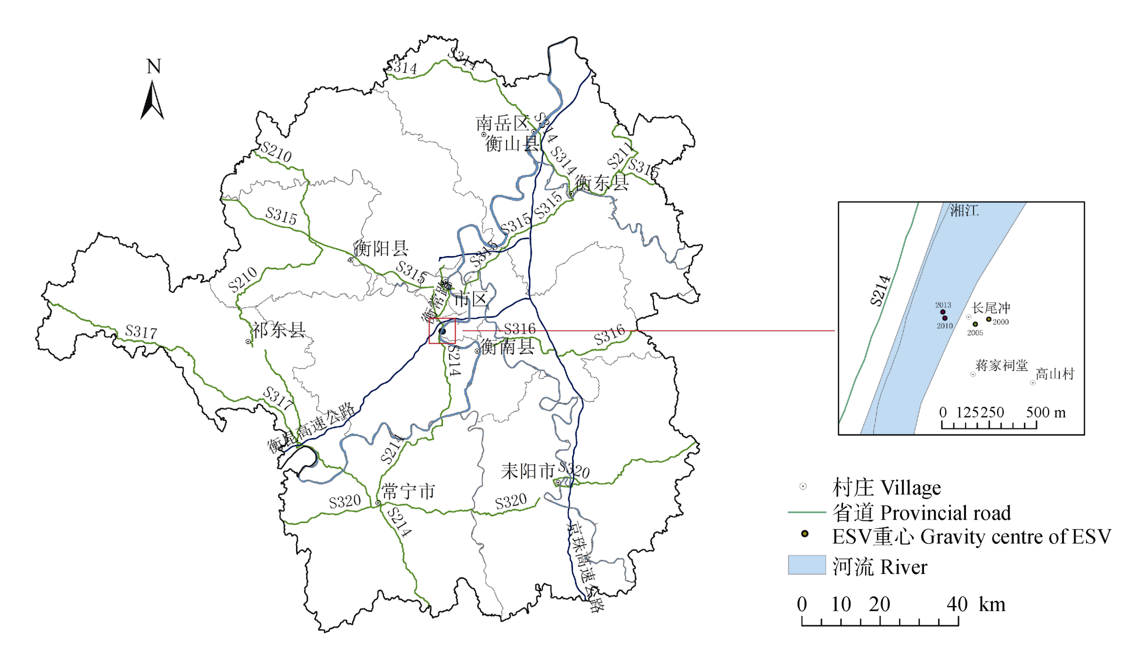


图 4 2000—2013 年衡阳市生态系统服务价值(ESV)重心落入处(左图)及其局部放大图(右图)
Fig. 4 Location of ecosystem services value (ESV) gravity centers in Hengyang (left picture) and its partial enlarged detail (right picture) from 2000 to 2013

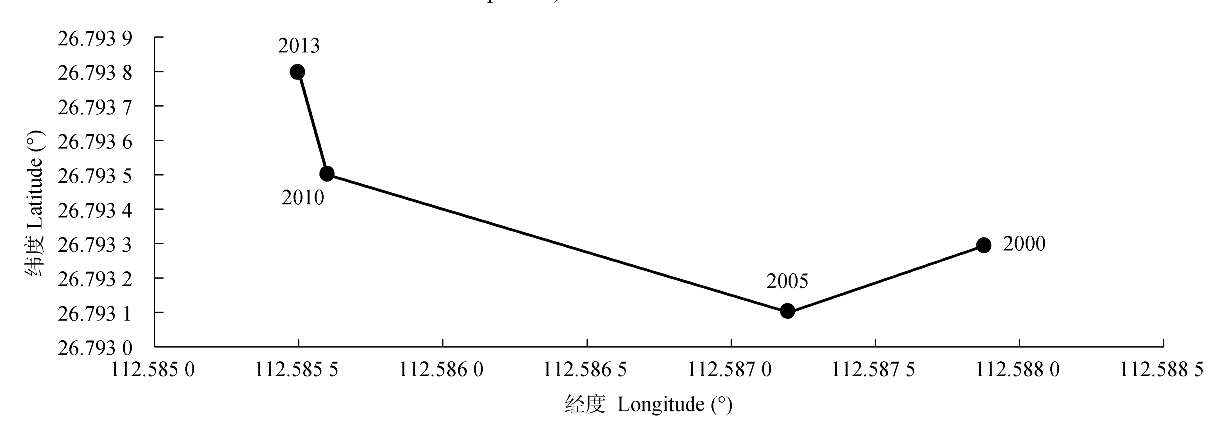


图 5 2000—2013 年衡阳市生态系统服务价值(ESV)重心迁移轨迹
Fig. 5 Moving track of ecosystem services value (ESV) gravity centers in Hengyang City from 2000 to 2013

方向移动。这可能与其各区、县的经济发展与人口增长的不平衡有关。衡阳市统计年鉴[24]显示，衡阳市的经济及人口存在空间分异，耒阳市、常宁市及衡南县的经济发展与人口增长规模较祁东县、衡东县及衡山县速度快，衡阳市的县域经济发展水平趋势主要为东高西低，这与本研究的 ESV 重心变化轨迹相呼应。

需要指出的是：①不同的 ESV 估算方法得到的结果很可能存在较大差异，目前 ESV 评估方法可大致分为“基于单位服务功能价格的方法”和“基于单位面积价值当量因子的方法”两类，相对于服务价格法，当量因子法由于直观且所需数据量少，且该方法特别适用于区域及全球尺度的 ESV 评估，便于进行结合 GIS 进行分析，因此研究采用此方法。②当量因子法存在缺陷之处，如研究区域内的某种用地类型的面积未发生变化，但其景观指数如斑块数目、平均板块面积、聚集度等发生了变化，这势必会对 ESV 产生影响，虽然生物量法对此能够有所修正，但不能完美解决此问题，因此有学者指出应进行不同空间层次、不同尺度的 ESV 评估实证分析[10,25]。③除用生物量法进行修正外，有学者还根据研究区农田生态系统的实际情况，对其食物生产的 ESV 系数进行修正[26]，或利用突变理论对我国的陆地生态系统的单位面积 ESV 系数进行修正[27]，不同的区域修正方法必将产生不同的 ESV 最终评估结果。④若能细分土地利用类型及分析更高分辨率栅格，研究结果将更为可信；另外限于篇幅，本文主要着重于 ESV 的平均分布、损益进行制图，以及空间统计方面的相关分析，未对 ESV 的时空分异特

征及其变化的驱动机制进行分析，这将在以后的研究中给予完善。

本研究主要结论如下:

1)2000—2013 年，衡阳市的 ESV 由 2000 年的 2 410 亿元降至 2013 年的 2 394 亿元；研究区中生物多样性保护、水源涵养、土壤形成与保护、气候调节及气体交换这 5 项服务功能较为突出，食物生产与娱乐休闲的价值量最低。衡阳市的 ESV 高值区对低值区呈包围态势，高值区主要分布于市界四周的山林地，中心区域由于地势较缓利于农耕及建设，因而成为 ESV 的低值区，这与衡阳市的盆地地形暗合。

2)林地及耕地转为建设用地，以及林地转为耕地是引起衡阳市 ESV 降低的最主要原因；ESV 损失区主要分布于市区、衡南县、衡阳县东部区域、耒阳市城区南部以及常宁市城区东南部。

3)衡阳市的 ESV 表现出明显的空间自相关与高低值聚集现象，2000—2013 年总 ESV 呈降低趋势，但其自相关与聚集程度趋于增强，即其空间分布的破碎化程度在降低；ESV 重心一直落入于市区南部稍偏西与衡南县车江镇的交接处，且迁移速度非常缓慢，主要向西稍偏北方向移动，呈“缓慢—剧烈—缓慢”的趋势。

根据研究结论，可考虑以下措施实现对衡阳市生态系统服务的有效管控:

1)限制林地及耕地向建设用地的转变；鼓励植树造林、退耕还湖，以抵消建设用地扩张而带来的 ESV 损失。

2)对 ESV 损失区重点监测，实施“存量”或“减量”用地政策以严格控制其范围，引导 ESV 系数低的土地利用类型向高的类型转变。

3)在编制区域土地利用总体规划中，可通过维护和强化区域整体生态系统格局的连续性，加强对林地、湿地及水域的保护，以提高研究区 ESV。

参考文献 References

[1] Westman W E. How much are nature’s services worth?[J]. Science, 1977, 197(4307): 960–964

[2] Daily G C. Nature’s Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems[M]. Washington DC: Island Press, 1997

[3] Wilson M A, Carpenter S R. Economic valuation of freshwater ecosystem services in the United States: 1971–1997[J]. Ecological Applications, 1999, 9(3): 772–783

[4] Liu J H, Gao J X. Measurement and dynamic change of ecosystem services value in the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(2): 145–153

[5] Costanza R, d’Arge R, De Groot R, et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253–260

[6] 欧阳志云，郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6183–6188
Ouyang Z Y, Zheng H. Ecological mechanisms of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6183–6188

[7] 欧阳志云，王如松，赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635–639
Ouyang Z Y, Wang R S, Zhao J Z. Ecosystem services and their economic valuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 635–639

[8] 傅伯杰，于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 1–9
Fu B J, Yu D D. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services[J]. Resources Science, 2016, 38(1): 1–9

[9] 傅伯杰，张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441–446
Fu B J, Zhang L W. Land-use change and ecosystem service: Concepts, methods and progress[J]. Progress in Geography, 2014, 33(4): 441–446

[10] 谢高地，鲁春霞，冷允法，等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189–196
Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189–196

[11] 谢高地，甄霖，鲁春霞，等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911–919
Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911–919

[12] 谢高地，张彩霞，张雷明，等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243–1254
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243–1254

[13] 王健，祁元，陈正华，等. 基于遥感技术的生态系统服务价值动态评估模型研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 739–747
Wang J, Qi Y, Chen Z H, et al. Modeling dynamic assessment on ecosystem services based on remote sensing technology — A case study on Gansu grassland ecosystem[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 739–747

[14] 孙洪泉，邓磊，蒋卫国，等. 长江三角洲地区生态资产评估[J]. 资源科学, 2008, 30(9): 1367–1373
Sun H Q, Deng L, Jiang W G, et al. Evaluation and change analysis of ecological capital in the Yangtze River Delta Region[J]. Resources Science, 2008, 30(9): 1367–1373

[15] 王宗明，张树清，张柏. 土地利用变化对三江平原生态系统服务价值的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(1): 125–128
Wang Z M, Zhang S Q, Zhang B. Effects of land use change on values of ecosystem services of Sanjiang Plain, China[J]. China Environmental Science, 2004, 24(1): 125–128

[16] 徐立, 刘少博, 刘云国, 等. 湘中红壤丘陵区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长沙市为例[J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1788–1792
Xu L, Liu S B, Liu Y G, et al. Effects of land use change on ecosystem services value in red soil hilly region of Central Hunan Province — A case study in Changsha City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(8): 1788–1792
[17] 李涛, 甘德欣, 杨知建, 等. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3787–3796
Li T, Gan D X, Yang Z J, et al. Spatial-temporal evolvement of ecosystem service value of Dongting Lake area influenced by changes of land use[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3787–3796
[18] 陈美球, 赵宝苹, 罗志军, 等. 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2761–2767
Chen M Q, Zhao B P, Luo Z J, et al. The ecosystem services value change in the upper reaches of Ganjiang River Based on RS and GIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2761–2767
[19] 熊善高, 万军, 龙花楼, 等. 重点生态功能区生态系统服务价值时空变化特征及启示——以湖北省宜昌市为例[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 296–302
Xiong S G, Wan J, Long H L, et al. Spatiotemporal dynamics and implications of ecosystem service value in the key ecological function area — Case of Yichang City, Hubei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 296–302
[20] Gos P, Lavorel S. Stakeholders' expectations on ecosystem services affect the assessment of ecosystem services hotspots and their congruence with biodiversity[J]. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2012, 8(1/2): 93–106
[21] 赵艳霞, 武爱彬, 刘欣, 等. 浅山丘陵区土地利用地形梯度特征与生态服务价值响应[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 141–145
Zhao Y X, Wu A B, Liu X, et al. Terrain gradient features and response of ecological services value in shallow hilly region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(3): 141–145
[22] 王志涛, 门明新, 崔江慧. 沽源县未利用地生态重要性空间识别及其地形梯度特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 256–264
Wang Z T, Men M X, Cui J H. Spatial recognition of ecological importance and analysis of terrain gradients characteristic of unused lands in Guyuan County[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(2): 256–264
[23] 李名勇, 晏路明, 王丽丽, 等. 基于高程约束的区域 LUCC 及其生态效应研究——以福州市为例[J]. 地理科学, 2013, 33(1): 75–82
Li M Y, Yan L M, Wang L L, et al. Regional LUCC and its ecological effect based on elevation constraint: A case study of Fuzhou City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(1): 75–82
[24] 衡阳市统计局. 衡阳统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000—2013
Hengyang Statistical Bureau. Hengyang Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000–2013
[25] 王一平. 南水北调中线工程水源地生态补偿问题的研究——基于生态系统服务价值的视角[J]. 南阳理工学院学报, 2011, 3(6): 67–71
Wang Y P. Study on the ecological compensation of the water source areas of the south-to-north water diversion middle routes project based on ecosystem services value[J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2011, 3(6): 67–71
[26] Wang W J, Guo H C, Chuai X W, et al. The impact of land use change on the temporospatial variations of ecosystems services value in China and an optimized land use solution[J]. Environmental Science & Policy, 2014, 44: 62–72
[27] 郑德凤, 臧正, 孙才志. 改进的生态系统服务价值模型及其在生态经济评价中的应用[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 584–593
Zheng D F, Zang Z, Sun C Z. An improved ecosystem service value model and application in ecological economic evaluation[J]. Resources Science, 2014, 36(3): 584–593